

# 지진격리 구조물의 지진모니터링 시스템 개발

## The Development of Seismic Monitoring System for a Base-Isolated Building

김성훈\* · 조대승\*\* · 박해동\*\*\* · 김두훈\*\*\*

Sung-Hoon Kim, Dae-Seung Cho, Hae-Dong Park, Doo-Hoon Kim

**Key Words** : Seismic monitoring(지진모니터링), Base Isolation(지진격리), LRB(납 면진받침)

### ABSTRACT

Nowadays, base isolation systems such as lead-rubber bearing, elastomer bearing and sliding bearing have been installed to the various structures to prevent the disaster from seismic. The performance of base isolation system have been well proved by model-scale experiments and numerical analysis. However, the seismic response data measured at real large base-isolated structures is still insufficient.

This paper presents a seismic monitoring system, acquiring real-time acceleration signals up to 32 channels, displaying time history and spectrum of the signals, storing the acquired data at a PC hard disk, and replaying the saved data. Moreover, the system can be operated without any limitation for monitoring period by automatic management of stored data file. The developed system has been installed at a real base-isolated building using lead-rubber bearings and we expect its seismic response data with ground motion signal can be well acquired in case of earthquake occurrence.

### 1. 서론

최근 지진으로 인한 인명 및 경제적 손실을 예방하기 위해 내진설계 규정<sup>(1,2)</sup>이 강화되면서 지반과 구조물 사이에 설치되어 지진 지반운동으로 인한 구조물의 과도한 수평운동을 방지하는 기능을 갖는 지진격리시스템(base isolation system)이 대형 건물과 교량, 파손시 대형 사고가 예상되는 가스 및 유류 저장 장치와 원전 설비 등에 많이 설치되고 있다.

지진제어 대상 구조물 또는 설비의 하중을 감당하면서도 지진으로 인한 피해를 예방할 수 있는 지진 격리시스템의 종류로서는 현재 고무베어링(elastomer bearing), 납면진 베어링(lead rubber bearing), 미끌림 베어링(sliding bearing) 등이 있으며, 이들의 성능은 다양한 실험 또는 해석적 연구를 통해 검증된 바 있다<sup>(3,4)</sup>. 그러나, 실제 지진 발생시 이들 지진격리시스템의 성능을 확인하고, 보다 성능이 뛰어난 시

스템을 개발하기 위해서는 지진 발생시의 지면 운동은 물론 이들 시스템이 적용된 구조물의 지진 응답을 확인할 수 있어야 한다. 그러나 현재까지 이와 같은 자료는 물론 이를 위한 모니터링 시스템을 구축한 사례를 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 개인용 컴퓨터와 범용 A/D보드를 이용해서 저렴한 비용으로 예기치 못한 지진 발생시의 지면 운동과 구조물의 지진 응답을 안정적으로 저장할 수 있으면서도 장기간 모니터링에 따라 누적되는 방대한 양의 모니터링 신호를 효율적으로 관리할 수 있는 실시간 지진응답 모니터링 시스템을 개발하고, 이를 납 면진베어링에 의해 지진 격리된 구조물에 설치한 사례를 소개하고자 한다.

### 2. 지진모니터링 대상 구조물

지진모니터링 대상 구조물은 충남 천안시에 소재한 유니스산업(주) 연구동 건물로서 지하 1층, 지상 3층, 연면적 2,446 m<sup>2</sup>인 철골조 건물이다. 본 건물은 Fig. 1에 보인 바와 같이 압반에 기초를 한 지지부위에 총 12개의 납 면진받침이 설치되어 지진격리된 구조물이다.

납 면진받침은 Fig. 2에 보인 바와 같이 적층 고무받침에 납봉을 삽입하여 만든 지진격리장치로서 현재 지진격리 장치중 세계적으로 가장 많이 사용되고 있으며, 국내에서도 LNG 탱크, 교량 및 건축물에 대한 적용 사례가 늘고 있다.

\* (주)크리에이티브

e-mail: hookim@hanmail.net

Tel: 051-510-3496 Fax: 051-510-8836

\*\* 부산대학교 조선해양공학과

\*\*\* 유니스산업(주) 기술연구소

납 면진받침 설치시 구조물은 고무로 인한 수평방향의 유연성에 의하여 구조물의 수평운동 주기가 길어짐으로서 구조물에 가해지는 지반운동의 단주기 성분 지진력을 감소시키는 기능과 함께 납의 소성 이력거동으로 강진 발생시 건축물에 입사되는 지진 에너지를 소산시키고 풍하중이나 약진 발생시 납의 초기강성으로 건축물의 지나친 수평운동을 제어하는 기능을 갖는다.

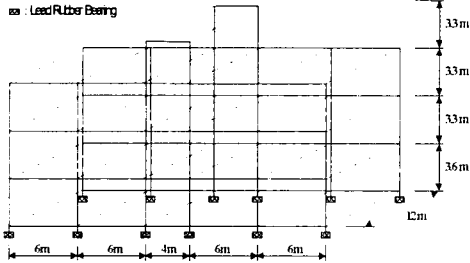


Fig. 1 Locations of lead-rubber bearings

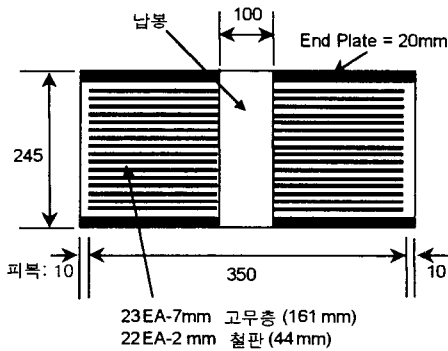


Fig. 2 Details of the lead-rubber bearing

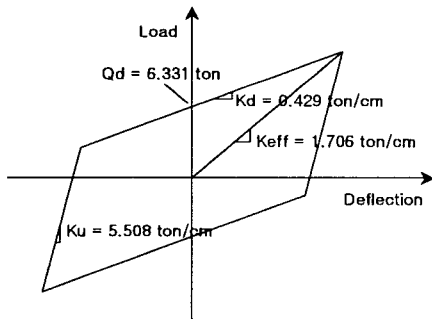


Fig. 3 Hysteresis curve of the lead-rubber bearing

납 면진 받침대는 지진 제어 대상 구조물의 내진 성능에

따라 달리 설계되어진다. Fig. 3에는 본 연구에서 선택한 지진 모니터링 대상 구조물에 장착된 납 면진받침의 이력특성을 나타내었다. 상기 납 면진받침은 0.12g에서 0.30g까지의 지진 발생시 지반에서 구조물로 전달되는 지진하중을 53% - 75%까지 감소시키게 설계되어 있다. 지진 발생시 지진가속도에 따라 예상되는 지진 모니터링 대상 구조물의 내진성능과 납 면진받침의 안전성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Design specifications of the base-isolated building using lead-rubber bearing

Seismic acceleration	0.12g	0.15g	0.2g	0.25g	0.3g	
Designed deflection(cm)	4.93	6.10	7.80	9.39	10.97	
SFR*	Fixed	0.150	0.187	0.250	0.312	0.374
	Isolated	0.071	0.076	0.082	0.088	0.094
	Ratio	2.11	2.46	3.05	3.55	3.98
Limit load (ton)	deflection	214.9	201.4	182.3	167.5	149.4
	buckling	204.5	196.5	184.9	174.1	163.4

\* SFR= (seismic force)/(building weight)

### 3. 지진모니터링 프로그램

#### 3.1 프로그램 개요

본 연구에서는 전술한 지진력리구조물의 실시간 지진모니터링을 위하여 개인용 컴퓨터와 16bit의 신호 분해능과 최대 100kHz의 샘플링 속도를 갖는 범용 A/D 보드를 이용해서 지진 신호를 모니터링할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 Visual C++ 6.0으로 작성하였으며, Windows 98, NT, 2000에서 실행 가능하다.

모니터링 프로그램은 다수의 실행 스레드(thread)를 OS(operating system)에 등록하면 OS가 이벤트(event)에 따라 스레드의 실행 순서를 선택하는 멀티스레드 방법<sup>(5)</sup>을 적용하여 Fig. 4에 보인 바와 같이 A/D 보드의 데이터를 PC로 가져오는 부분과 신호처리, 데이터 저장, 화면표시 부분의 루틴을 각각 다른 스레드(thread)로 분리하여 작성하였다. 따라서, 개발된 프로그램은 입력 데이터가 A/D보드의 신호 저장용 메모리를 반 이상 점유할 경우에만 PC 메모리로 데이터를 가져오고, 데이터 입력 대기시간 동안에 PC 메모리에 입력된 이산신호의 FFT(fast Fourier transform) 계산과 데이터 저장 및 저장 기한을 초과한 자료파일의 삭제 등의 명령을 처리할 수 있어 A/D보드로부터 취득되는 신호를 누락없이 실시간 분석 및 저장할 수 있다.

### 3.2 모니터링 채널 수와 샘플링 주파수

지진 모니터링 프로그램의 성능은 PC와 A/D 보드의 성능에 따라 달라진다. 이는 A/D 보드에서 취득한 자료를 PC로 가져오는 대기 시간 동안에 화면에 데이터를 표시하거나 FFT와 같은 연산을 완료해야 하기 때문이다. 현재 개발된 모니터링 프로그램을 32채널 A/D 보드를 장착한 Pentium II 350MHz, RAM 128M의 PC에서 운용할 경우 각 채널당 약 700Hz까지의 신호 취득이 가능하다. 이는 지진의 주파수 범위를 일반적으로 0.1~30Hz로 보는 것과 비교해 보면 충분한 성능을 가진다고 판단된다. 한편, 모니터링 가능한 최대 채널 수는 입력 채널의 수가 많은 A/D 보드를 이용하거나 복수개의 A/D 보드를 장착하면 증가시킬 수 있으며, 모니터링 가능한 신호의 주파수 범위도 연산 성능이 보다 좋은 PC를 사용하면

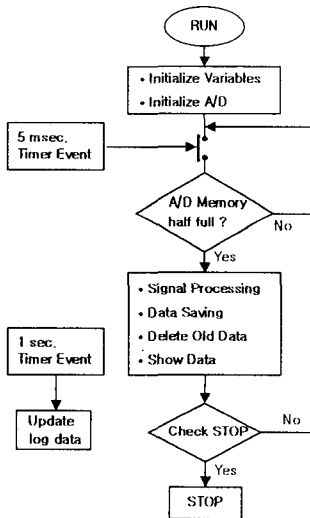


Fig. 4 Flow chart of the seismic monitoring program

면 확대시킬 수 있다.

### 3.3 프로그램 구성과 기능

개발된 프로그램의 주 화면을 Fig. 5에 나타내었다. 주 화면은 다음과 같은 표시창으로 구성되어 있다.

#### 입력 신호 표시창

각 채널에 입력되는 시간 신호 또는 이의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 최대 32개의 창까지 선택적으로 활성화시킬 수 있으며, 각 창 별로 시간 또는 주파수를 나타내는 x축과 가속도 크기를 나타내는 y축의 범위를 마우스 또는 키보드를 사용하여 지정할 수 있을 뿐만 아니라 커서를 이용해서 특정부분의 값을 읽을 수 있다. 또한, 가속도 크기를 나타내

는 축은 피크치, rms치를 선형 또는 로그 스케일로 나타낼 수 있다.

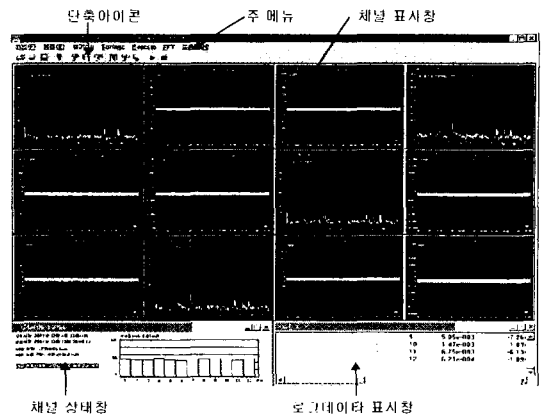


Fig. 5 Main window of the seismic monitoring program

#### 채널 상태 창

모니터링 중인 채널의 신호값을 막대그래프로 보여주고, 모니터링 시작 시간, 현재 시간 및 신호 저장 가능한 기한을 나타낸다. 하드디스크 용량이 지정된 저장 가능 기한보다 작을 경우와 모니터링 중인 채널에 입력되는 신호가 설정된 범위를 초과하는 경우에는 경고 표시를 나타내어 모니터링 상태를 신속하게 파악할 수 있도록 한다.

#### 로그데이터 표시창

각 채널에서 취득된 1024개의 자료 당 최대치, 최소치, 피크 및 rms 평균치와 지정된 시간 간격동안 모니터링된 신호의 최대치, 최소치, 피크 및 rms 평균치를 경고 발생 유무와 일자와 함께 표시한다.

한편, 개발된 프로그램에 반영된 모니터링 환경 설정과 취득된 자료의 관리 및 재생 기능은 다음과 같다.

#### 신호취득 조건 설정

모니터링할 채널의 수와 입력 신호의 전압 범위 및 각 채널당 샘플링 주파수를 지정하며, 각 채널에 입력되는 신호의 시간이력 또는 주파수 스펙트럼의 화면 표시 유무를 선택할 수 있다.

#### 채널 환경 설정

신호를 취득하는 각 채널의 번호, 이름, 센서의 sensitivity, 표시 물리량 및 경고 레벨을 설정할 수 있다.

Ch	Ch. Name	Sensitivity[mV/In]	Alarm [Peak]	Alarm [RMS]
1	건물기초	1018.250 mV/In	0.150	10.000
2	건물기초	986.850 mV/In	0.150	10.000
3	건물기초	1063.930 mV/In	0.150	10.000
4	LRB상부	1005.100 mV/In	0.150	10.000
5	LRB상부	1031.410 mV/In	0.150	10.000
6	LRB상부	1001.330 mV/In	0.150	10.000
7	지진수평	1015.100 mV/In	0.150	10.000
8	지진수평	956.350 mV/In	0.150	10.000
9	지진수평	1025.790 mV/In	0.150	10.000
10	건물육상	995.310 mV/In	0.150	10.000
11	건물육상	982.450 mV/In	0.150	10.000
12	건물육상	1036.500 mV/In	0.150	10.000

Fig. 6 Window to specify monitoring options

### FFT 메뉴

입력된 시간이력 신호를 이용해서 FFT 계산<sup>(6)</sup>을 수행할 경우 적용할 창함수(window function)를 hanning, rectangular, flat top window의 3가지 창함수 중에 선택할 수 있고, overlap 비율을 0%, 50%, 67%, 75% 중에서 선택할 수 있다. 또한, 선형 및 지수 함수를 이용한 평균치 산정 기능을 선택할 수 있다.

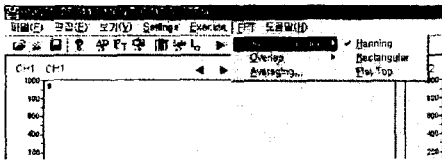


Fig. 7 Menu to select FFT options

### 자료 저장 기능

예기치 못한 순간에 발생된 지진신호의 저장을 위하여 모니터링된 모든 시간이력 자료와 로그 자료는 각각 모니터링 일자 및 시간을 파일이름으로 하는 binary 파일과 ASCII 파일로 저장된다. 아울러, 설정된 모니터링 환경은 저장 후 다음 모니터링 환경 설정시에 활용할 수 있다.

한편, 지진과 같이 예기치 않은 신호를 취득·보존하기 위해서는 상시 실시간 모니터링을 수행해야 한다. 이 경우 취득한 데이터가 매우 많아지므로 하드 디스크상의 저장 공간 부족으로 인해 모니터링 기능의 중단은 물론 PC 시스템이 다운될 수도 있다. 이에 개발된 프로그램에서는 장기간 모니터링과 효율적 자료 관리를 위해 다음과 같은 3가지 자료 저장 조건을 선택할 수 있다.

#### · Trigger 모드

측정된 데이터가 설정된 기준치를 초과할 경우에 경고 발생 전 1분부터 경고 발생 후 2분까지 취득된 신호의 시간 이력 자료를 저장한다.

#### · 수동 모드

사용자가 지정한 시간 간격동안에 취득된 신호의 시간 이력 자료를 저장한다.

#### · 자동 모드

모니터링 실행 후 매 시간 단위로 데이터를 저장한다.

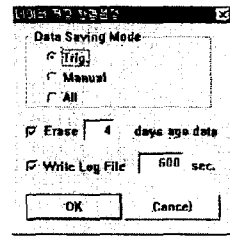


Fig. 8 Window to specify data file management options

상기의 방법으로 저장된 자료 파일들은 사용자가 지정한 별도의 기한이 경과되면 자동적으로 삭제된다.

### 저장된 자료의 재생 기능

지진 발생 등으로 인해 저장된 자료를 확인·분석할 경우의 편의성을 도모하기 위하여 binary 형태로 저장된 시간이력 자료는 실시간 모니터링에서와 마찬가지로 Fig. 5에 나타난 주화면상에서 재생할 수 있다. 또한, 효율적인 신호 확인을 위해 신호의 재생속도를 지정할 수 있으며, 특정 시간대의 신호로 이동하는 기능을 지원한다. 아울러, 지정된 채널 또는 모든 채널의 자료값을 ASCII 파일로 저장하거나 모니터링 화면을 클립보드로 복사할 수 있다.

## 4. 지진모니터링 시스템의 설치 및 운용

개발된 프로그램과 Fig. 9에 나타난 신호 취득 장비를 이용해서 2장에 기술한 지진 격리 건물에 대한 지진 모니터링 시스템을 설치하였다. 지진응답을 모니터링하기 위한 가속도계는 Fig. 10에 보인 바와 같이 지반 건물 기초부, 남 면진 받침 상부 및 건물 상층부에 총 12개를 설치하되 각 위치당 3개의 가속도계를 설치하여 상하 및 수평 진동을 측정할 수 있도록 하였다. 가속도계는 0.15~1000Hz 범위의 최대 0.5g의 진동신호를 측정할 수 있는 것을 이용하였다. Fig. 11에 건물 기초부 및 남 면진받침 상부에 실제로 설치된 가속도계의 사진을 예시하였다.

지진모니터링 시스템은 0.015gal의 분해능으로 가속도 신호를 취득할 수 있고 각 채널 당 샘플링 주파수를 100Hz로 설정하여 지반과 지진격리장치 상하부 및 옥상에 3축방향으로 총 12개의 지진신호를 취득할 수 있도록 설정되어 있다. 현재 약 5개월 동안 모니터링을 수행하였으나 지진이냐 다른 충격하중 등으로 인해 특기할 만한 신호가 측정된 바는 없다.

## 참고 문헌

- (1) UBC, 1997, "Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures".
- (2) AASHTO, 1999, "Guide Specification for Seismic Isolation Design".
- (3) James M. Kelly, 1997, *Earthquake-Resistant Design with Rubber*. Springer, New York.
- (4) R. I. Skinner, W. H. Robinson, G. H. Mcverry, 1993, *An Introduction to Seismic Isolation*. Willy, New York.
- (5) Jeff Prorise, 2000, *Programming Windows with MFC*. Microsoft Press, Washington.
- (6) W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, 1992, *Numerical Recipes in C*. Cambridge, New York.

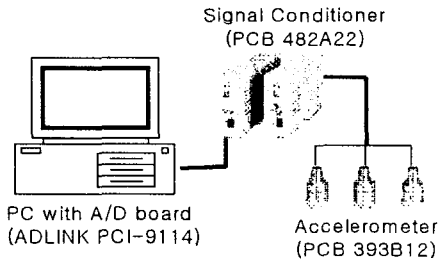


Fig. 9 Instruments for seismic monitoring

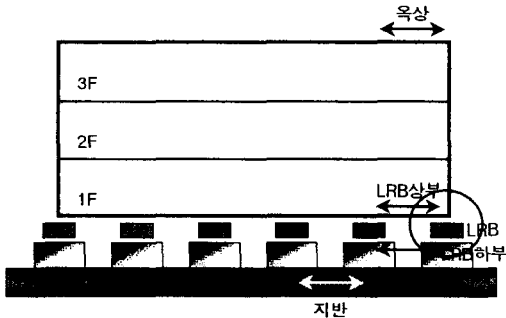


Fig. 10 Seismic monitoring locations

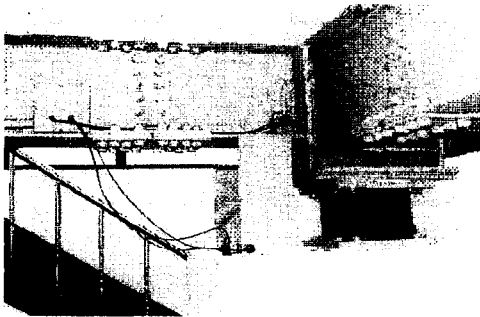


Fig. 11 Accelerometers to monitor seismic response at the building base

## 5. 결론

본 연구에서는 개인용 컴퓨터와 범용 신호취득보드를 이용한 지진 모니터링 시스템을 개발하고 납 면진받침에 의해 지반과 격리된 건물에 설치한 사례를 소개하였다. 개발된 시스템은 예기치 못한 지진으로 인한 지반 및 건물의 동적 응답을 취득할 수 있어 지진으로 인한 건물의 동적 응답 특성 분석은 물론 지진 격리 장치의 성능 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 아울러, 개발된 모니터링 시스템은 대형 건물, 교량, 플랜트, 발전소 등의 다양한 신호 모니터링 시스템을 경제적으로 구축하는데 활용될 수 있다고 판단한다.